

ESPECIFICACION Y COMPARACION DE MODELOS DE DISPERSION DEL TRAFICO PARA TECNICAS DE SIMULACION BASADAS EN HISTOGRAMAS CICLICOS DE FLUJO

Jaime Gibson y Mónica Wityk
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Casilla 228/3, Santiago, Chile

RESUMEN

En los programas computacionales para tráfico en redes que han alcanzado mayor difusión (TRANSYT y SATURN) la circulación en los arcos de la red se representa por un modelo de dispersión. En este trabajo se aborda, desde diversos ángulos, la modelación de este fenómeno. Se discute la derivación de modelos de dispersión a partir de distribuciones del tiempo de viaje, proceso en que es clave un tratamiento adecuado del contexto cíclico en que se hace la predicción, y la calibración del parámetro T, que es dependiente de la distribución asumida. A continuación son formulados tres modelos, asociados a diversas distribuciones del tiempo de viaje: cuasi-geométrica (que es el bien conocido de Robertson, corrigiendo un error de especificación), uniforme y triangular simétrica. Estos modelos son sometidos a comparación en una red de Santiago, con TRANSYT-8. Los resultados muestran que el índice de rendimiento que calcula el programa es sensible al modelo de dispersión y al valor del parámetro T. En cambio, la coordinación óptima de los semáforos no lo es. Se encuentra también que el modelo de comportamiento más errático, e influido por el punto de partida del proceso de optimización, es el de Robertson que, no obstante, es el que actualmente se usa. El modelo más promisorio es el basado en la distribución triangular simétrica que, a la vez, es la que parece ajustarse mejor a la real.

1. INTRODUCCION

En las últimas dos décadas han aparecido numerosos programas computacionales para analizar el tráfico vehicular en redes. Entre ellos, los de mayor acogida en el campo profesional son TRANSYT (Robertson, 1969) y SATURN (Bolland *et al.*, 1979). Ambos simulan el tráfico apoyándose en histogramas cíclicos de flujo (Robertson, 1974). Aunque estos programas fueron concebidos principalmente como herramientas para el diseño y evaluación de medidas de gestión de tránsito son también empleados, con creciente frecuencia, para el estudio de proyectos de inversión en transporte urbano (SACTRA, 1986; Comisión de Transporte Urbano, 1988).

La diversidad de aplicaciones justifica dedicar esfuerzos a mejorar las capacidades de modelación de dichos programas, más aún si están de por medio decisiones de inversión de monto significativo. Uno de los aspectos en que se ha producido poca investigación es la circulación en los arcos de la red, en contraste con la considerable atención que se ha brindado a los nodos (intersecciones).

En la clase de técnicas de simulación basadas en histogramas cíclicos de flujo, los arcos son representados principalmente por un modelo de dispersión del tráfico entre intersecciones consecutivas. Este trabajo presenta, en el Capítulo 2, una discusión teórica del fenómeno de dispersión y de los modelos comunmente utilizados. El Capítulo 3 está destinado a una formulación consistente de modelos de dispersión para tres distribuciones del tiempo de viaje: cuasi-geométrica, uniforme y triangular simétrica. Incluye un análisis del problema de la calibración de los parámetros de estos modelos. El Capítulo 4 contiene una comparación de resultados de los diversos modelos en una red TRANSYT en Santiago de Chile. Los comentarios finales y proposiciones para investigación ulterior se entregan en el Capítulo 5.

2. PLANTEAMIENTO Y REVISION DEL PROBLEMA

2.1 El fenómeno de la dispersión del tráfico

La existencia de intersecciones, sobre todo semaforizadas, induce la formación de grupos o pelotones de vehículos, que se disgregan a continuación en tanto las velocidades individuales de estos sean diferentes. La siguiente intersección fuerza un reagrupamiento y el proceso se repite. En esto consiste el fenómeno (observable) de dispersión. Su intensidad depende exclusivamente de la distribución espacial de velocidades.

Es decir, si se conoce la distribución temporal de las pasadas de vehículos en el extremo inicial de un tramo y la distribución espacial de las velocidades con que recorren los vehículos el tramo, se puede predecir la distribución temporal (histogramas) de pasadas por el extremo final. En programas como TRANSYT o SATURN se modela explícitamente la transformación del histograma originada por cada intersección. A su vez, el proceso de dispersión da cuenta de la transformación del histograma de salidas de una intersección en el de llegadas a la siguiente. En consecuencia, la verdadera incógnita en cuanto a los arcos es la distribución de velocidades.

En este sentido, la modelación de la circulación en los arcos podría ser abordada con exactitud sólo a través de la dispersión siempre que fuera viable introducir en la distribución de velocidades todos los fenómenos que ocurren en ellos en la realidad. Los principales son: interacción de vehículos (relación velocidad-flujo), paradas de transporte público, interferencia con estacionamiento en la calzada o con peatones que cruzan. No hay razón para pensar que la combinación de estos factores conduzca siempre a una misma distribución, afectando sólo a sus parámetros.

Si no hay modelación explícita de los fenómenos señalados - que es el caso, salvo un tipo sencillo de paradero en TRANSYT - es altamente probable que la distribución más apropiada para las velocidades sea diferente entre arcos. Esto plantea un difícil problema práctico. Una opción es intentar identificar que distribución es adecuada para un determinado tipo de arco; otra es suponer una cierta distribución de validez general y buscar el ajuste casuístico mediante el valor de sus parámetros. El primer camino tiene dos grandes desventajas. Requiere una enorme cantidad de trabajo empírico sin que haya ninguna seguridad de que se obtenga pocas y manejables distribuciones. Por otro lado, al haber varias distribuciones habría varios modelos de dispersión y en cada aplicación el modelador debería elegir cual usar en cada arco de la red. El segundo camino evita la última desventaja pero ofrece dudas sobre la representatividad de la distribución y, en cierto modo, traslada el problema a la estimación de los parámetros del modelo.

2.2 El contexto cíclico

Como las intersecciones semaforizadas suelen ser abundantes en áreas urbanas y para coordinarlas se les hace operar con el mismo ciclo (o la mitad de él) en zonas relativamente extensas, la formación de pelotones está sujeta a una regularidad temporal. De aquí el concepto de histograma cíclico de flujo, que corresponde al histograma de pasadas durante un ciclo del semáforo y se supone que se repite durante un cierto período en que los flujos y la programación son estables. Los programas computacionales referidos admiten la existencia de fluctuaciones aleatorias pero las incorporan analíticamente en la modelación de intersecciones y, por lo tanto, no entran en el proceso de dispersión.

Sin embargo, el contexto cíclico introduce una particularidad en la dispersión. Denotando por n el número de intervalos de que consta el histograma (un ciclo) hay que advertir que un vehículo que entra a un tramo en un cierto intervalo i y demora j intervalos en recorrerlo, aparecerá en el histograma del extremo final en el intervalo $i + j$ al igual que uno que demore $j+n$, $j+2n$, etc. O sea, este histograma depende de la distribución de velocidades o tiempos de viaje en el tramo, de la longitud del tiempo de ciclo y del número de intervalos en que se divide.

Si se acepta como posible todo tiempo de viaje no negativo, la predicción del histograma final está dado por:

$$q_2(i) = \sum_{j=1-n+1}^i q_1(j) \sum_{\varepsilon=0}^{\infty} P(t=i-j+\varepsilon n), \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

donde:

- $q_2(i)$: flujo en el intervalo i al final del tramo
- $q_1(j)$: flujo en el intervalo j al inicio del tramo ($q_1(j \pm n) = q_1(j)$)
- $P(t)$: función de densidad de probabilidad del tiempo de viaje
- ε : número entero.

Si se imponen límites, inferior o superior, a la distribución hay que ajustar los límites de las sumatorias en la ec. (1). Obviamente, conociendo $q_1(j)$ - histograma aguas arriba - y $P(t)$, se puede predecir $q_2(i)$.

2.3 Trabajos previos

Hasta ahora, los escasos trabajos publicados en que se formulan modelos de dispersión se inscriben en la línea de adoptar una sola distribución. Entre ellos destacan los de Pacey (1956), que usó una normal; Robertson (1969) que planteó directamente un modelo de dispersión, cuya distribución de tiempos de viaje implícita fue estudiada anteriormente por Seddon (1972); y Tracz (1975), que trabajó con una distribución uniforme.

En la práctica se usa casi exclusivamente el modelo de Robertson, por ser el implementado en TRANSYT y SATURN. Su expresión original es:

$$q_2(i+T) = F q_1(i) + (1-F) q_2(i+T-1) \quad (2)$$

donde $F = (1+KT)^{-1}$ es un factor de dispersión, T un parámetro que representa el tiempo mínimo de viaje (en intervalos) y K es un parámetro a calibrar.

El modelo de Tracz es:

$$q_2(i) = F \sum_{j=i-M}^{i-T} q_1(j) \quad (3)$$

donde $F=(1+M-T)^{-1}$ es un factor de dispersión, T y M son los tiempos mínimo y máximo de viaje, respectivamente (en intervalos). De la ec. (3) se puede derivar un modelo recursivo, como el de Robertson, que queda:

$$q_2(i+T) = F [q_1(i) - q_1(i+T-M-1)] + q_2(i+T-1). \quad (4)$$

Ambos modelos (ecs. 2 y 4) son computacionalmente muy simples y tienen dos parámetros cada uno: T y K , T y M . Pero hay, de partida, una diferencia sustancial: el factor de dispersión es un parámetro de la distribución de tiempos de viaje en el modelo de Robertson (que se sustituye empíricamente por K) y una variable auxiliar, determinada por los parámetros de la distribución de tiempos de viaje, en el modelo de Tracz.

Cuando estos modelos son examinados con una inclusión rigurosa del contexto cíclico, se detectan problemas de especificación si $M-T > n$. En publicaciones anteriores (Gibson y Aguirre, 1984; Gibson, 1987) se presenta un análisis detallado al respecto. En síntesis, las conclusiones pertinentes son:

- 1) el modelo de Robertson supone, implícitamente, siempre que $M-T > n$. Ello conduce a que deba introducirse una expresión especial para el primer intervalo ($q_2(1+T)$) en orden a asegurar conservación del flujo, como había notado Lam (1977). En TRANSYT, esta dificultad es resuelta con iteraciones adicionales del proceso de dispersión, con resultados equivalentes;
- 2) la expresión para el factor F de Robertson es inconsistente y el parámetro K no representa ningún grado de libertad. Si se sustituye por $F = (1+t-T)^{-1}$, eliminando K , el modelo funciona bien (Gibson, 1985);
- 3) el modelo de Tracz sólo es válido si $M-T < n$. En caso contrario, la ec. (4) se modifica y hay que añadir una expresión para el primer intervalo. El modelo reformulado se presenta en la Sección 3.3.

Con frecuencia se menciona en la literatura que la predicción de los histogramas es casi indiferente a la distribución de tiempos de viaje que se suponga. Esta constatación empírica puede comprenderse a la luz de la discusión de la Sección 2.1 acerca de la poco

plausible estabilidad de la distribución. Pero hay motivos para ser reticente a aceptarla en tanto fue derivada de experimentos con modelos de dispersión que contienen, como se ha visto, errores de especificación. Además, estos han obscurecido notablemente la estimación de los parámetros.

Tanto Robertson como Tracz, y otros investigadores que han publicado experimentos de calibración (El-Reedy y Ashworth, 1978; Lam, 1977) emplearon fórmulas del tipo $T=\beta t$, donde t es el tiempo medio de viaje, y métodos dependientes de la especificación del modelo de dispersión. No hay ninguna prueba de que esa sea la forma más adecuada para $T=f(t)$ y, de hecho, las estimaciones del parámetro K reportadas son notablemente dispares.

Entonces, si bien estos modelos de dispersión han logrado resultados satisfactorios en la práctica, es evidente que pueden ser mejorados corrigiendo su especificación y desarrollando métodos apropiados de calibración. Por otra parte, las distribuciones del tiempo de viaje que les subyacen (cuasi-geométrica y uniforme) son poco realistas en muchos casos y nada flexibles en su forma. Probar con distribuciones menos limitadas parece también interesante, en la medida que ellas se traduzcan en modelos de dispersión computacionalmente eficientes y con parámetros de similar naturaleza y cantidad. En lo que sigue de este trabajo se da cuenta de algunos avances obtenidos en estas direcciones.

3. MODELOS DE DISPERSION

3.1 Generalidades

La derivación de modelos de dispersión de tipo recursivo a partir de una distribución de tiempos de viaje se realiza con la ec. (1). El desarrollo en cada caso es largo por lo que no se incluirá aquí. Puede encontrarse en las referencias señaladas. Se consideran tres distribuciones: cuasi-geométrica y uniforme por ser las que han tenido algún uso, y una triangular simétrica. Esta se trata por primera vez; la razón para introducirla es que su forma es más próxima a la observada en algunos experimentos (Seddon y Dixon, 1973) y tiene los mismos parámetros que la uniforme. Luego, es útil para estudiar la influencia de la distribución de tiempos de viaje en la predicción de histogramas de flujo.

Todas estas distribuciones son discretas, para adaptarse a la división del ciclo en un número finito de intervalos. Para cada una de ellas se presenta la función densidad de probabilidad, el modelo recursivo de dispersión; los supuestos asociados y la definición de sus parámetros y variables auxiliares. Después se hace una breve discusión sobre sus propiedades fundamentales y la calibración del parámetro T .

3.2 Distribución cuasi-geométrica

La función densidad de probabilidad es:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & , \quad t < T \text{ ó } t > M \\ F(1-F)^{t-T} / [1-(1-F)^{M-T+1}] & , \quad T \leq t \leq M \end{cases} \quad (5)$$

donde T y M son tiempos de viaje mínimo y máximo (en intervalos) y $0 < F \leq 1$. El modelo recursivo está dado por:

$$q_2(i+T) = F[q_1(i) - (1-F)^{M-T+1} q_1(i+T-M-1)] / [1-(1-F)^{M-T+1}] + (1-F) q_2(i+T-1). \quad (6)$$

Sólo si se supone que $M = (m+1)n+T-1$, con $m \in \mathbb{N}^+$, ó $M=T$, se reduce a la ecuación de Robertson (ec. 2). Calculando la media de la distribución con inclusión de este supuesto, resulta:

$$t = T-1 + 1 / F - (m+1) n / [(1-F)^{-(m+1)n} - 1],$$

que reordenada queda:

$$F = 1 / \{[1+t-T + (m+1)n] / [(1-F)^{-(m+1)n} - 1]\}. \quad (7)$$

La expresión del factor de dispersión F en función de T y t no es pues arbitraria y ésto explica que el parámetro K de Robertson produzca inconsistencias. Gibson y Aguirre demostraron que, dado el supuesto sobre M , la aproximación $F=(1+t-T)^{-1}$ da buenos resultados. Nótese que ella satisface $0 < F \leq 1$, ya que $t \geq T$.

Con esto, el modelo de dispersión corregido es:

$$q_2(1+T) = F / [1-(1-F)^n] \sum_{j=2}^{n+1} q_1(j) (1-F)^{n+1-j} \quad (8a)$$

$$q_2(i+T) = F q_1(i) + (1-F) q_2(i+T-1), \quad i=2, \dots, n \quad (8b)$$

$$F = 1 / (1+t-T). \quad (8c)$$

Este modelo tiene dos parámetros (t y T), uno menos que la distribución de tiempos de viaje, gracias al supuesto sobre M y la aproximación para F .

3.3 Distribución uniforme

La función de densidad de probabilidad es:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & , \quad t < T \text{ ó } t > M \\ 1 / (1+M-T) & , \quad T \leq t \leq M \end{cases} \quad (9)$$

En esta distribución se cumple que $M=2t-T$, de modo que ella puede definirse completamente con los parámetros t y T . El modelo recursivo de dispersión que se obtiene con ellos está dado por:

$$q_2(1+T) = F[(1+m) \sum_{i=1}^n q_1(i) - \sum_{i=2}^{n-p} q_1(i)] \quad (10a)$$

$$q_2(i+T) = F[q_1(i) - q_1(i-p-1)] + q_2(i+T-1), \quad i=2, \dots, n \quad (10b)$$

$$F = 1 / [1+2(t-T)] \quad (10c)$$

$$m = \text{INT} [2(t-T) / n] \quad (10d)$$

$$p = 2(t-T) - mn. \quad (10e)$$

Aquí el factor de dispersión F se introduce simplemente por analogía, pero no es un parámetro independiente. Como n , m y T son enteros por definición y p debe serlo, es necesario que $2t$ sea un entero. Es fácil demostrar que si $m=0$, la ec. (10b) es idéntica a la (4).

3.4 Distribución triangular simétrica

Esta es una distribución discreta con ley de densidad similar a la triangular continua y se le supone, como es tradicional, simetría. La función de densidad de probabilidad es:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & , \quad t < T \text{ ó } t > M \\ 1+t-T / [1+(M-T) / 2]^2 & , \quad T \leq t \leq (M+T)/2 \\ 1+M-t / [1+(M-T) / 2]^2 & , \quad [(M+T)/2+1] \leq t \leq M \end{cases} \quad (11)$$

que tiene sólo dos parámetros, T y M . Por su simetría, se cumple que $M=2t-T$. Con esta relación puede derivarse un modelo de dispersión con parámetros t y T . Hasta ahora, sólo se ha resuelto el caso en que se satisface $M < T+2n$, en que el modelo es:

$$q_2(1+T) = F \left\{ \sum_{i=1}^{p+1} [(p+1-i) (q_1(i-p) + q_1(n+1-p-i))] + \sum_{i=1}^{p+1} q_1(n+i-p) \right\} \quad (12a)$$

$$q_2(i+T) = F \left[\sum_{j=0}^p q_1(n+i-j) - \sum_{j=p+1}^{2p+1} q_1(n+i-j) \right] + q_2(i+T-1), \quad i=2, \dots, n \quad (12b)$$

$$F = 1 / (1+t-T)^2 \quad (12c)$$

$$p = t - T. \quad (12d)$$

La limitación sobre el tiempo máximo M se traduce en $p \leq n-1$. Para que p sea entero, t debe también serlo. Nuevamente se introduce un factor de dispersión F por analogía, que no implica un parámetro adicional y satisface $0 < F \leq 1$. El análisis de la distribución de tiempos de viaje y el desarrollo del modelo de dispersión serán publicados posteriormente.

3.5 Propiedades fundamentales de los modelos

En primer lugar, los tres modelos permiten recorrer todo el rango de dispersión posible, que está controlado por el factor F . Cuando $F=1$, la dispersión es nula ($M=T=t$) y todos predicen una traslación paralela del histograma $q_1(i)$ en T intervalos, como debe suceder. Cuando $F=0$, la dispersión es total ($M=t=\infty \neq T$) y todos los modelos predicen un histograma $q_2(i)$ uniforme, que es lo esperado. No obstante, entre estos valores extremos un mismo grado de dispersión no está asociado con iguales valores para F , ya que las fórmulas de este factor (ecs. 8c, 10c y 12c) son distintas.

En segundo lugar, las distribuciones del tiempo de viaje que suponen son sensiblemente diferentes y sin embargo todos los modelos quedan en función de los mismos dos parámetros: t y T . En el caso de la distribución cuasi-geométrica esto es consecuencia de un supuesto sobre un parámetro (M) y una aproximación para otro (F). El supuesto impone una cota máxima al tiempo de viaje que es alta, usualmente muy superior al M

observado, cuyos efectos no son muy significativos porque en esta distribución la probabilidad decae rápidamente con el tiempo de viaje.

Una propiedad que debe exigirse a un modelo de dispersión de este tipo es que reproduzca bien el tiempo medio de viaje. Esto es, como t es un parámetro del modelo, la predicción de $q_2(i)$ descansa en un valor dado de él. Pero hecha la predicción, de los histogramas $q_1(i)$ y $q_2(i)$ es posible, bajo ciertas condiciones, determinar t , el que debería ser igual al valor inicial. Los modelos derivados de las distribuciones uniforme y triangular cumplen esta propiedad con la sola restricción de que t sea tal que la variable p sea entera. El de Robertson corregido la satisface muy razonablemente (con error inferior a medio intervalo) únicamente si se adoptan el supuesto y la aproximación que se han señalado. Es decir, con la expresión original de $F((1+KT)^{-1})$ puede haber notorias diferencias en la reproducción de t (Gibson, 1985).

Otra propiedad deseable es que haya transitividad en la predicción, *i.e.* que predecir un histograma $q_2(i)$ a partir de uno $q_1(i)$ directamente o pasando por uno intermedio sea indiferente. Ninguno de los modelos presentados tiene esta propiedad pues las distribuciones del tiempo de viaje que les dan origen no la cumplen. En todo caso, la que está más cercana es la triangular porque es la única de las tres cuya forma es invariante a la adición.

Por último, cabe destacar dos aspectos ligados al uso profesional de estos modelos. Uno es la necesidad de que sean computacionalmente eficientes porque son requeridos múltiples veces para cada simulación de una red. Su implementación en TRANSYT-8, que se trata en el Capítulo 4, ha mostrado que el tiempo de ejecución es prácticamente igual. El otro aspecto dice relación con los parámetros, t y T . En los modelos de tráfico en redes t es conocido para cada arco. Entonces, sólo se requiere disponer de valores para T . Como se ha dicho en la Sección 2.3, hasta ahora se ha recurrido a funciones $T=f(t)$ de carácter empírico, cuyos parámetros han sido poco estudiados, pero se emplean universalmente sus valores por defecto que contienen los programas computacionales. Es importante tener en consideración que si bien el significado físico de T (tiempo mínimo de viaje) es único, en tanto parámetro del modelo de dispersión puede admitir una interpretación más compleja. Como se sabe que la distribución del tiempo de viaje supuesta no refleja frecuentemente la real y t es dato, la única manera de buscar un mejor ajuste del modelo de dispersión es mediante T . Entonces, aunque continúe desempeñando el papel de tiempo mínimo conviene no medirlo sino calibrarlo. Es decir, buscar el tiempo mínimo que mejor predice el histograma aguas abajo para cierta distribución del tiempo de viaje implícita, en vez de obtener el T real. Esta perspectiva confiere relevancia al problema de calibración del parámetro T .

3.6 Calibración de T

Entendido T como el parámetro que permite emprender una reconciliación entre la distribución del tiempo de viaje supuesta y la real y habida cuenta de la multitud de factores que inciden en esta última, es evidente que hay razones para esperar una variabilidad no despreciable de T . La primera cuestión que se plantea es si este parámetro debe ser tratado con independencia del resto. Una respuesta inmediata surge de reescribir las fórmulas para el factor de dispersión con T como variable dependiente:

$$\text{Cuasi-geométrica:} \quad T = t - (1-F)/F \quad (13a)$$

$$\text{Uniforme:} \quad T = t - (1-F)/2F \quad (13b)$$

$$\text{Triangular:} \quad T = t - (1-\sqrt{F})/\sqrt{F} \quad (13c)$$

En todos los casos, T está relacionado con t y F. Si el factor de dispersión, propio a cada distribución, está ligado a t en la realidad, cabría establecer una función $T=f(t)$, como se ha hecho hasta ahora. Pero es claro que, de existir, la relación $F=g(t)$ es específica a cada distribución y no hay fundamento para postular que dado un mismo t, el parámetro T más adecuado sería igual en los tres casos.

Se desprende la necesidad de disponer de relaciones específicas para cada distribución para estimar T. Que ellas tengan como variable independiente a t es conveniente por razones prácticas y tiene una base en las ecs. (13a) (13b) y (13c). Pero hay dos problemas por resolver: la especificación de $T=f(t)$ y la calibración de sus parámetros para cada distribución.

Una característica rescatable de los trabajos previos es la distinción de $T=f(t)$ entre arcos de tráfico general y de buses. La existencia de paradas en los últimos lógicamente ha de modificar la manera en que se presenta el fenómeno de dispersión. Hay que reconocer, sin embargo, que no se sabe de estudios sistemáticos acerca de la especificación más adecuada de $T=f(t)$. Para que ellos sean fructíferos es indispensable usar métodos de calibración que sean independientes de tal especificación, condición que no satisface ninguno de los empleados en los trabajos publicados sobre el particular. Gibson (1986) propone un método no restrictivo para los modelos basados en una distribución cuasi-geométrica o una uniforme del tiempo de viaje pero no ha sido aplicado todavía a la escala requerida para obtener confiablemente una especificación o valores de sus parámetros.

Con todo, hay que tener presente que la forma matemática de los modelos de dispersión es insensible a $T=f(t)$. Esta es una relación adicional a ellos. Obviamente, su calidad predictiva se verá incrementada al aclararse este punto. Mientras no haya resultados sólidos de investigaciones al respecto, es razonable continuar usando las formas tradicionales según tipo de vehículo:

$$\text{Tráfico general:} \quad T = \text{INT}(\beta t + 0,5) \quad (14a)$$

$$\text{Buses:} \quad T = \text{INT}(\gamma t_r + \delta b + 0,5) \quad (14b)$$

donde

t_r = tiempo medio en movimiento del bus en el tramo

b = tiempo medio de parada del bus en el tramo

t = tiempo medio de viaje en el tramo ($b + t_r$, en el caso de buses)

β, γ, δ = parámetros.

Atendida la discusión precedente, el valor de los parámetros β, γ y δ debe ser específico al modelo de dispersión. Aún más, para un mismo modelo es esperable que haya variación en los parámetros entre tipos de calle. Coeymans, Novoa y Willumsen (1987) reportan mejoras sustanciales en el ajuste de histogramas predichos con TRANSYT-8 (con el modelo de dispersión corregido, ecs. (8a), (8b) y (8c)) en una calle de Santiago de Chile con alto flujo de buses, merced a un cambio en el parámetro γ con respecto a su valor por defecto, en los arcos en que hay paradero con alta fricción.

En suma, las potencialidades de cada modelo de dispersión sólo pueden ser exploradas rigurosamente incorporando explícitamente un parámetro T consistente, tarea nada trivial.

4. COMPARACION DE MODELOS

En los trabajos citados por Seddon y Tracz aparecen comparaciones de predicciones con distintas distribuciones del tiempo de viaje. Se limitan a histogramas correspondientes a tramos de vía entre intersecciones. La aplicación relevante de modelos de dispersión es, no obstante, en redes y es en este marco que conviene insertar la comparación. Esto impone incorporar los tres modelos formulados en un programa computacional adecuado. Se escogió TRANSYT-8 (Vincent, Mitchell y Robertson, 1983) por ser el más difundido y, a la vez, el que recoge la dispersión con más fineza (cada contribución a un arco es dispersada separadamente y se distinguen arcos de buses, con y sin paradero). Las modificaciones afectan a 4 subrutinas del programa: TINPUT, STOPUT, SUBPT y SPLOT. Además de posibilitar el uso de los tres modelos de dispersión, dejan al usuario la opción de especificar los parámetros de T (ver ecs. 14a y 14b), quedando los valores que usa TRANSYT como valores por defecto.

La comparación se establece en dos niveles. El primero es la simulación del tráfico en la red; el segundo, la optimización de la programación de semáforos. En ambos planos pueden surgir diferencias a causa del modelo de dispersión mismo o del valor de T. El método de comparación tiene que facilitar la discriminación pertinente.

Se trabaja con la red de la Figura N^o 1 que corresponde al acceso Nor-Oriente al centro de Santiago de Chile. Contiene 13 nodos y 70 arcos (26 de buses y 44 de vehículos livianos) de variada longitud, incluso algunos tienen parada de buses. Esta red es subconjunto de una que fue sometida a validación con notable éxito (Ross y Gibson, 1987). El período a considerar es la punta de la mañana, en que se produce la mayor demanda.

Las situaciones a comparar son:

- 1) simulación del tráfico en la red con una misma programación de semáforos variando el modelo de dispersión y el parámetro T;
- 2) optimización de la coordinación de los semáforos (desfases) variando el modelo de dispersión y el parámetro T. Como el procedimiento de optimización de TRANSYT es heurístico, se recurre a dos soluciones iniciales bien distintas: una con desfases nulos en fase 1 en todos los nodos y otra con los desfases óptimos encontrados mediante corridas reiteradas del programa con el modelo de dispersión de Robertson corregido.

En todos los casos se computa el índice de rendimiento ("performance index") de la red descontando los arcos de entrada porque al no experimentar dispersión son insensibles a los cambios en estudio. Los ponderadores empleados para demoras y detenciones son sólo los genéricos (tarjeta tipo 1). Todos los nodos operan en ciclo simple ($c = 82$ segs.) con dos fases y los repartos fueron fijados por equisaturación.

Para los parámetros de T hay dos conjuntos de valores. Uno, los que usa TRANSYT por defecto: $\beta = 0,80$, $\gamma = 0,85$, $\delta = 0,30$. El otro es distinto según el modelo y fue elegido ateniéndose a lo reportado en la literatura y a experimentos propios muy limitados. De ellos pues puede decirse que son valores razonables pero en modo alguno los más representativos. Estos se presentan en la Tabla N^o 1.

Estas definiciones dan origen a 12 corridas del programa: una por cada modelo de dispersión, para las cuatro combinaciones de programación inicial y parámetros. Los índices de rendimiento (IR) de la red obtenidos figuran en la Tabla N^o 2, separados para las situaciones inicial y final.

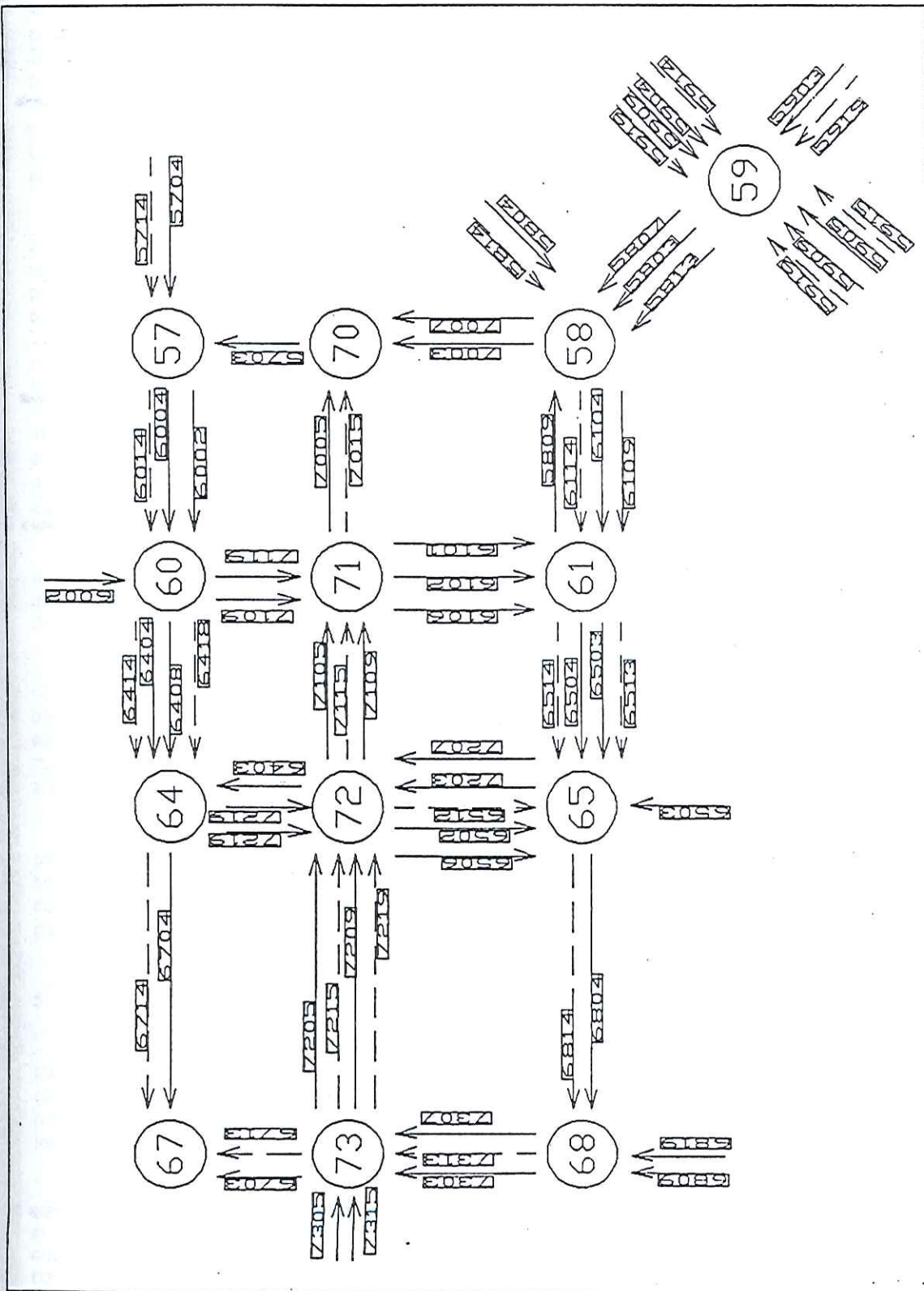


FIGURA N° 1: Diagrama de la red

Las comparaciones referentes a simulación deben hacerse sobre la primera de ellas y las relativas a optimización, sobre la segunda.

TABLA N° 1: Parámetros utilizados en la modelación

Modelo	Parámetro			
	β	δ	γ (con parada)	γ (sin parada)
Cuasi-geométrica	0,80	0,30	0,85	0,65
Uniforme	0,70	0,30	0,75	0,65
Triangular	0,65	0,30	0,70	0,60

TABLA N° 2: Índice de rendimiento de la red (excluyendo arcos de entrada)

Prog.	Caso		Modelo ¹	Situación		Mejora(%)
	Inic.	Param.		Inicial	Final	
Desfases nulos Fase 1	Por defecto		CG	648,7	444,5	31,5
			U	657,8	378,6	42,4
			TS	637,0	374,9	41,1
	Especif.		CG	620,0	454,1	26,8
			U	640,0	395,9	28,1
			TS	635,0	379,0	40,3
Desfases optimos CG	Por defecto		CG	385,3	385,3	0,0
			U	377,2	376,6	0,2
			TS	374,2	373,4	0,2
	Especif.		CG	402,6	401,9	0,2
			U	389,1	389,1	0,0
			TS	378,1	377,1	0,3

¹Se identifica cada modelo por la distribución del tiempo de viaje subyacente (CG: cuasi-geométrica; U: uniforme; TS: triangular simétrica).

En cuanto a simulación, se aprecia que hay variación significativa según el modelo y sus parámetros. Dada una programación y la red, diversas combinaciones de modelo y parámetros implican diferencias en IR de 6,1%, para desfases nulos, y 7,6%, en el otro caso. Se deben en similar proporción al modelo y al valor de los parámetros de T. El modelo más errático es el de Robertson corregido y el más estable el derivado de una distribución triangular simétrica. Por otra parte, en los 4 casos el modelo U arroja IR mayor que TS. Sin embargo, un análisis desagregado por tipo de vehículo indica que esto esconde otro sesgo: en buses, el modelo U da IR siempre menor y lo contrario ocurre con los vehículos livianos. El resultado global es sólo consecuencia del mayor flujo de estos últimos.

Ahora, desde la perspectiva de la coordinación óptima hay cuatro hechos destacables. En primer lugar, la programación correspondiente al óptimo (si bien no es seguro que este no sea local) parece muy estable. Los dos últimos casos muestran que modificar el modelo y los parámetros de dispersión no conduce sino a cambios marginales en ella. Segundo, hay una notable discrepancia en la habilidad para llegar al óptimo con la secuencia estándar de TRANSYT-8. El modelo CG es altamente sensible a la programación inicial, lo que hace indispensable hacer corridas encadenadas con el óptimo anterior como solución de partida. Los otros dos modelos son poco sensibles, especialmente el TS (diferencia de 0,5%). Tercero, el IR asociado a la programación óptima evidencia mayor sensibilidad a los parámetros que al modelo de dispersión. Por último, llama la atención la estabilidad del modelo TS en su estimación de IR: entre los 4 casos la máxima variación es de 1,5% (5,1% para U y 17,8% para CG) y para cada conjunto de parámetros es de 1% (hasta 4,6% para U y hasta 4,3% para CG).

Es preciso tener presente que no es correcto en estas comparaciones asociar unívocamente menor IR a mejor resultado, ya que no se sabe que conjunto de parámetros, y qué modelo, representa más fielmente la realidad. Por otro lado, como se ha dicho, el tiempo de ejecución del programa (en un computador IBM 3031) es prácticamente idéntico.

Estos resultados aportan sólidas bases para rechazar la tesis de la indiferencia de la dispersión del tráfico a la distribución del tiempo de viaje asumida. Más aún, la distribución cuyas propiedades parecen más próximas a las reales es la que tienen un comportamiento más estable. La importancia del valor de los parámetros de T varía con la distribución pero, en cualquier caso, este experimento es muy restringido para obtener conclusiones fundadas acerca de este tema.

Pero, ¿cómo explicar el innegable éxito práctico de TRANSYT como herramienta para coordinar semáforos si usa el modelo de dispersión que en esta red es el de conducta más errática, y con un error de especificación corregido en este? La respuesta es que la coordinación óptima no parece depender significativamente del modelo de dispersión y sus parámetros, por anti-intuitivo que esto sea. El problema es cuál es el IR asociado.

5. COMENTARIOS FINALES

Se ha probado que la simulación y optimización de tráfico en redes es sensible al modelo de dispersión y sus parámetros, en términos de la estimación del índice de rendimiento. Las variaciones de éste en el experimento son iguales o mayores que las que producen medidas de gestión o diseño físico. Si se quiere disponer de buenos estimadores de los beneficios de estos proyectos es necesario mejorar la modelación de la dispersión.

Es alentador que el modelo asociado a la distribución del tiempo de viaje que parece más realista (la triangular simétrica) sea el que muestra un comportamiento más estable. A su vez, es llamativo que el modelo que se usa en la actualidad (derivado de una distribución cuasi-geométrica) sea el más errático. Esto se debe, en buena medida, a que supone un tiempo máximo de viaje demasiado grande que lo lleva a predecir una "cola" del pelotón poco

numerosa pero influyente en la estimación de demoras. Y nótese que en este trabajo se ha empleado una versión que corrige un error de especificación del modelo incorporado en TRANSYT y SATURN.

Se confirma también la teoría planteada acerca de la interpretación del parámetro T. Sin embargo, puesto que investigaciones serias sobre su especificación y la calibración de sus parámetros son altamente consumidoras de recursos es conveniente estudiar primero si la insensibilidad del modelo TS a este parámetro es válida en redes distintas a la de este trabajo. De ser así, la importancia del parámetro T sería considerablemente menor.

Por último, se recomienda a los usuarios de TRANSYT modificar el modelo de dispersión en el programa. El más atractivo (TS) tiene por ahora la restricción $T \geq t+1-n$. Es casi irrelevante en la práctica y se está desarrollando una versión no limitada. Entretanto, incluso el modelo U es mejor que el existente.

REFERENCIAS

BOLLAND, J.D., HALL, M.D. y VAN VLIET, D. (1979) SATURN: a model for the evaluation of traffic management schemes. Working Paper 106, Institute for Transport Studies, University of Leeds.

COEYMANS, J.E., NOVOA, H. y WILLUMSEN, L. (1987) Simulación de buses en ejes semaforizados. *Actas del Tercer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Universidad de Concepción, 18-20 noviembre 1987, Concepción.

COMISION DE TRANSPORTE URBANO (1988) *Manual de diseño y evaluación social de proyectos de vialidad urbana*. Santiago.

EL-REEDY, T. Y. y ASHWORTH, R. (1978) Platoon dispersion along a major road in Sheffield. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 19, N° 4, 186-189.

GIBSON, J. y AGUIRRE, J.F. (1984) Replanteamiento del modelo de dispersión de Robertson. *Actas del Tercer Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte*, ATNP, 18-21 septiembre 1984, Sao Paulo.

GIBSON, J. (1985) Consecuencias prácticas de un nuevo modelo de dispersión del tráfico. *Actas del Segundo Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Universidad Católica de Chile, 12-14 noviembre 1985, Santiago.

GIBSON, J. (1986) Un método de calibración de los parámetros de dispersión del tráfico. Publicación ST-INV/02/86, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

GIBSON, J. (1987) Generalización del modelo de dispersión del tráfico basado en una distribución uniforme de tiempos de viaje. *Actas del Tercer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Universidad de Concepción, 18-20 noviembre 1987, Concepción.

LAM, J.K. (1977) Studies of a platoon dispersion model and its practical implication. *Proceedings of the 7th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, The Institute of Systems Science Research, 14-17 agosto 1977, Kyoto.

PACEY, S.M. (1956) The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal. RRL Research Note RN/266/GMP (no publicada).

ROBERTSON, D.I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool. *Report LR253*, Road Research Laboratory, Crowthorne.

ROBERTSON, D.I. (1974) Cyclic flow profiles. *Traffic Engineering and Control*. Vol. 15, N° 14, 640-641.

ROSS, P. y GIBSON, J. (1987) Comparación experimental del control dinámico y por planes prefijados de una red de semáforos en el centro de Santiago. *Actas del Tercer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Universidad de Concepción, 18-20 noviembre 1987, Concepción.

SACTRA (1986) *Urban Road Appraisal*. HMSO, Londres.

SEDDON, P.A. (1972) Another look at platoon dispersion: 3. The recurrence relationship. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 13, N° 10, 442-444.

SEDDON, P.A. and DIXON, M.L. (1973) The distribution of journey time for vehicles leaving traffic signals. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 15, N° 7, 345-347.

TRACZ, M (1975) The prediction of platoon dispersion based on rectangular distribution of journey time. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 16, N° 11, 490-492.

VINCENT, R.A., MITCHELL, A.I. and ROBERTSON, D.I. (1980) User guide to TRANSYT version 8. *Report LR 888*, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.